

PAT-NO: DE003818044A1

DOCUMENT-IDENTIFIER: DE 3818044 A1

TITLE: Precision measurement device for large displacements

PUBN-DATE: November 30, 1989

INVENTOR-INFORMATION:

NAME

COUNTRY

KUEHNE, CHRISTOPH DIPL PHYS

DE

ASSIGNEE-INFORMATION:

NAME

COUNTRY

KUEHNE CHRISTOPH DIPL PHYS

DE

APPL-NO: DE03818044

APPL-DATE: May 27, 1988

PRIORITY-DATA: DE03818044A (May 27, 1988)

INT-CL (IPC): G01B011/00;G01B011/02

EUR-CL (EPC): G01B011/02 ; G01D005/36

US-CL-CURRENT: 356/401

ABSTRACT:

The proposed device measures large displacements (several meters) between two mechanical components with high precision (fractions of μm) independently of the prior history of the measurement. For this purpose, a plurality of linear scales having precise graduations are juxtaposed in their linear direction and a plurality of linear diode arrays are arranged on the displaceable part of a device in such a way that they can scan the scales at a plurality of points.

The scales are precisely divided essentially in uniform increments, but the regularity of the graduation is interrupted at intervals that are somewhat smaller than the length of the arrays by so-called code fields. The latter are recognised by microprocessors, which detect the arrays, as a coding for the absolute displacement of the two components, while the interpolation of uniform graduation ensures the high resolution .

①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑪ **DE 38 18044 A 1**

⑤1 Int. Cl. 4:
G01 B 11/00
G 01 B 11/02

②1 Aktenzeichen: P 38 18 044.8
②2 Anmeldetag: 27. 5. 88
④3 Offenlegungstag: 30. 11. 89

Behördeneigentum

DE 38 18044 A 1

⑦1 Anmelder:
Kühne, Christoph, Dipl.-Phys., 7928 Giengen, DE

⑦2 Erfinder:
gleich Anmelder

⑤4 **Präzisions-Meßeinrichtung für große Verschiebungen**

Die vorgeschlagene Einrichtung mißt große Verschiebungen (mehrere Meter) zwischen zwei mechanischen Bauelementen mit hoher Präzision (Bruchteile von μm) unabhängig von der Vorgeschichte der Messung. Hierzu werden mehrere Längenmaßstäbe mit präzisen Teilungen in ihrer Längsrichtung aneinandergelegt und mehrere lineare Diodenarrays auf dem verschieblichen Teil der Einrichtung so angeordnet, daß diese die Maßstäbe an mehreren Stellen abtasten können. Die Maßstäbe sind im wesentlichen in gleichartige Inkremente präzise geteilt, jedoch ist die Gleichförmigkeit der Teilung in Abständen, die etwas kleiner als die Länge der Arrays sind, durch sog. Codefelder unterbrochen. Diese werden von Mikroprozessoren, die die Arrays detektieren, als Codierung für die absolute Verschiebung der beiden Bauteile erkannt, während die Interpolation der gleichförmigen Teilung die hohe Auflösung sicherstellt.

DE 38 18044 A 1

Beschreibung

Die Erfindung macht sich zur Aufgabe, die eindimensionale Positionsdifferenz zweier zueinander verschieblichen mechanischen Beuelemente über große Positionsdifferenzen von mehreren Metern mit Genauigkeiten von $0,2 \mu\text{m}$ und darunter zu messen. Die Messung soll — von einer Anfangskalibrierung bei der Inbetriebnahme abgesehen — nicht von der Vorgeschichte abhängen, soll die Differenz als absolute und eindeutige Zahl liefern und soll mit nur einem meßtechnischem Prinzip auskommen.

Die Erfindung fußt auf zwei bekannten Bauelementen, den geteilten Präzisionsmaßstäben und den eindimensionalen photoelektrischen Multidetektoren (lineare Photodioden-Arrays).

Geteilte Maßstäbe, vorzugsweise aus Glas oder glasartigem Material, sind als Längenverkörperungen für lineare Messungen wohl bekannt. Ist hohe Genauigkeit gefordert, so ist jedoch ihre Länge, fertigungstechnisch bedingt, auf z. Zt. 2 m oder weniger begrenzt. Größere Längendifferenzen müssen durch eine Stückelung von Maßstäben überbrückt werden. Der meßtechnische Anschluß dieser Stückelungen wird nach bisherigen Methoden durch einen wechselweise seitlichen Versatz der Maßstäbe und getrennten Ableseeeinrichtungen hergestellt unter Verwendung von zusätzlichen Meßeinrichtungen zur Unterscheidung der einzelnen Maßstäbe. Zur Erzeugung absoluter, von der Vorgeschichte unabhängiger Meßwerte sind die Maßstäbe im allgemeinen in mehreren Spuren geteilt, deren Inkremente einem bestimmten digitalen Code (binär, Gray-Code, o. ä.) entsprechen und deren Anzahl m die maximale Länge der Messung auf das $2m$ -fache eines Inkrementes begrenzt. Je nach Größe des Inkrementes, die die Auflösung bestimmt, sind bei großen Lagedifferenzen sehr viele Spuren ($m > 18$) erforderlich. Dies gilt auch dann, wenn zur Erhöhung der Auflösung die feinste Spur zusätzlich und mehrfach interpoliert wird. Solche vielspurigen Teilungen herzustellen ist äußerst aufwendig. Bei den Maßstäben, die nach dieser Erfindung verwendet werden sollen, wird daher unter Ausnutzung der Eigenschaft der Multidetektoren eine andere, einspurige Art der Codierung vorgeschlagen, die das $2m$ -fache eines größeren Abstandes s zu überbrücken vermag.

Um die Schwierigkeiten mehrspuriger Teilungen zu umgehen, werden auch häufig einspurige, äquidistante Teilungen verwendet, die in inkrementaler Zähltechnik abgetastet werden. Diese Technik kann systembedingt nur Änderungen des Ortes, nicht den Ort selbst messen und benötigt daher nach jedem Einschalten eine Nullung des Zählers. Die Gewinnung der absoluten Lagedifferenz setzt die Nullung an einer separat anzufahrenden Referenzmarke und ein ungestörtes Arbeiten voraus. Die Referenzmarke anzufahren ist gerade bei langen Distanzen unbequem, und Störungsfreiheit ist in vielen Anwendungsfällen nicht gewährleistet. Zählverfahren verlieren z. B. nach einer äußeren Erschütterung der Meßeinrichtung im allgemeinen ihren Meßwert. Ferner können Meßeinrichtungen mit inkrementaler Zähltechnik nicht feiner messen als es dem Inkrement entspricht.

Literaturhinweise:

¹⁾ Miyamoto, M. und Kühne, C.: "An accurate derivation of the division corrections in a photoelectric meridian circle". *Astron. Astroph. Suppl. Ser.* 50, 173—186, (1982)

²⁾ Kühne, C.: "A new automatic meridian circle PMC 190". *Astron. Astrophys.* 121, 165—173, (1983)

Lineare Multidetektoren sind gut geeignet, Maßstabsteilungen unterschiedlichster Art zu messen. Sie werden handelsüblich bis zu einer Länge von 50 mm mit Diodenelementen von 13 bis $25 \mu\text{m}$ Breite hergestellt. Die Ablesetechnik ¹⁾ ²⁾ besteht darin, die Teilung geeignet zu beleuchten und mit optischen Mitteln oder im einfachen Schattenwurf auf den Detektor abzubilden. In einem erwünschten Zeitpunkt, bzw. einer Folge von Zeitpunkten wird der Detektor elektronisch "abgefragt" und die photometrischen Ausgangswerte der Diodenelemente vorübergehend gespeichert. Diese werden einem Mikroprozessor zugeführt, der die weitere Verarbeitung der Meßwerte übernimmt. Bedeckt das Bild eines Teilstriches etwa 10 Diodenelemente, dann kann der Mikroprozessor dessen Lage auf dem Detektor messen und bis auf etwa $1/25$ der Diodenbreite interpolieren, ausgedrückt als Elementnummer und deren Bruchteile.

Erfindungsgemäß werden nun mehrere Maßstäbe und mehrere Detektoren geeignet zueinander angeordnet, daß, wie im folgenden beschrieben, die Verschiebung der Detektoren über die Gesamtlänge aller Maßstäbe mit hoher Präzision gemessen werden kann. Es sind dargestellt in

Fig. 1 ein Längsschnitt durch die Meßeinrichtung, längs derer die Verschiebung zu messen ist,

Fig. 2 ein Querschnitt durch die Meßeinrichtung zur Darstellung der Beleuchtung der Teilung und des Detektors,

Fig. 3 ein Ausschnitt der Teilung, der Codefelder und der Teilung des Detektors,

Fig. 4 die Lage von drei Detektoren relativ zu den Codefeldern.

Es sind 1 und 2 die Träger der beiden Bauelemente, deren Lagedifferenz längs der Zeichenebene von Fig. 1 gemessen werden soll. In 1 sind Maßstäbe 3.1, 3.2, ... eingelegt, die auf der dem Träger 2 zugewandten Seite mit einer Teilung versehen sind. Die Anzahl der Maßstäbe ist in Abhängigkeit von ihren Einzellängen so gewählt, daß die maximal zu messende Lagedifferenz, zusätzlich eines angemessenen Überlaufes erfaßt werden kann. Die Maßstäbe bestehen vorzugsweise aus transparenter Glaskeramik oder Quarz mit vernachlässigbarem thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Es darf davon ausgegangen werden, daß die Maßstäbe nach der Kunst der Feinwerktechnik spannungsfrei, aber wohldefiniert so aneinander angelegt werden, daß ihre Abstände konstant bleiben und dennoch so in ihrer Bettung gleiten können, daß die unterschiedliche Temperaturexpansion zwischen den Maßstäben und dem Träger 1 ohne Einfluß bleibt. Die Maßstäbe sind so ausgerichtet, daß ihre, die Teilungen tragenden Oberflächen bis auf wenige $0,01 \text{ mm}$ in einer Ebene liegen.

Im Träger 2 ist ein Zwischenträger 4 eingebettet, der vorzugsweise aus dem gleichen Material besteht wie die Maßstäbe, mindestens aber aus einem Material gleicher Temperaturexpansion. Auf dem Zwischenträger 4 sind photoelektrische Multidetektoren 5.1, 5.2, ... angebracht, deren photoempfindliche Schichten in einem geringen Abstand ($0,1 \text{ mm}$) parallel über der Teilung der Maßstäbe liegen. Nach dem Erfindungsgedanken gibt es mindestens 2 solcher Detektoren. In den hier aufgeführten Abbildungen ist der Fall mit drei Detektoren gezeichnet.

Unter den vielen Möglichkeiten der Beleuchtung von Teilung und Detektor ist eine solche dargestellt, die aus optischen Einrichtungen 6.1, 6.2, ... besteht, die neben jedem Detektor 5.1, 5.2, ... im Träger 2 angebracht sind und deren Licht durch den transparenten Körper der

Maßstäbe hindurch über reflektierende Flächen 7 die Teilung 8 beleuchten und deren Schattenriß auf die photoempfindliche Fläche 9 der Detektoren projiziert.

Die Teilung der Maßstäbe besteht nach dem Erfindungsgedanken zum überwiegenden Teil aus einer äquidistanten Folge von abwechselnd lichtdurchlässigen und -undurchlässigen Inkrementen, die zweckmäßigerweise, aber nicht notwendig gleich breit sind. Das Teilungsintervall hat die Breite b . Die Gleichförmigkeit der Teilung wird in Abständen s , das ein ganzes Vielfaches von b ist, durch m Codefelder 10.1, 10.2, ... 10. m unterbrochen. Ein Codefeld wird durch eine Störung der Gleichförmigkeit der Teilung, z. B. durch zwei aufeinanderfolgende lichtundurchlässige Inkremente 11 eingeleitet. Sie signalisieren dem analysierenden Mikroprozessor, daß die nun folgenden m Felder als Code für den Ort auf dem Maßstab zu interpretieren sind. Wählt man $m = 7$, wie im Beispiel der Fig. 3, dann können auf nur einer Spur $2^7 = 128$ verschiedene Orte längs der gesamten zu messenden Strecke unterschieden werden.

Nach dem Erfindungsgedanken wird die Teilung auf n Multidetektoren 5.1, 5.2, ... 5. n projiziert, wie Fig. 3b zeigt. Die Detektoren besitzen eine große Zahl von Elementen, z. B. 1024 wie in Fig. 3b, deren Breite etwa $1/20$ der Intervallbreite b beträgt. Der den Detektoren nachgeschaltete Mikroprozessor analysiert die photometrischen Meßwerte auf zweierlei Weise.

Erstens sucht er von links nach rechts fortschreitend eine Störung 11. Hat er auf dem k -ten Detektor (k aus $1 \dots m$) eine gefunden, dann interpretiert er die anschließenden m Felder der Teilung als duale Zahl (z. B. j aus $1 \dots 2^m$) und stellt fest, daß auf dem k -ten Detektor der Anfangspunkt A des j -ten Codefeldes auf dem j -ten Element des Detektors liegt. In Fig. 3a bedeutet beispielsweise das erste Codefeld $j = 0L0L0LL = 39$, das zweite $j = 0L0L000 = 40$.

Zweitens werden von allen Teilungsstrichen aller Detektoren — mit Ausnahme der Störungsstriche und der Codefelder — die Orte der photometrischen Medianwerte der lichtdurchlässigen oder -undurchlässigen Inkremente berechnet, die ganzzahligen Elementnummern abgezogen, von den Resten der Mittelwert gebildet und dieser als Interpolationswert dem Ort i des Anfangspunktes A hinzugefügt.

Um nach dem Erfindungsgedanken die Eindeutigkeit der Messung sicherzustellen, werden die Abstände der Detektoren so gewählt, daß in jeder Verschiebelage der beiden Träger 1 und 2 mindestens ein Codefeld auf einem der Detektoren liegt. Hierzu genügt es, den Abstand der Codefelder $s = m \cdot 1$ zu wählen, worin 1 die nominelle Länge eines Detektors ist. Die Abstände der Detektoren voneinander wird als ein geradzahliges bzw. ungeradzahliges Vielfaches von s/m gewählt, je nachdem m ungeradzahlig bzw. geradzahlig ist. Um den Übergang der Codierung von einem Detektor zum anderen sicherzustellen, muß die effektive Länge l' der Detektoren mindestens um die Länge eines Codefeldes + 2 Inkremente größer als die nominelle sein. Ein solcher Übergang und eine der möglichen Abstandsanordnungen der Detektoren sind in Fig. 4 dargestellt. Die Ebene der Detektoren ist darin um 180 Grad in die Ebene der Teilung umgeklappt.

Um die Störungen der Teilung zu unterdrücken, die unvermeidlich an den Stoßstellen 12 zweier benachbarter Maßstäbe entstehen, wird erfindungsgemäß vorgeschlagen, diese als Pseudocodefelder auszubilden, z. B. als eine Folge von $3 + m + x$ aufeinanderfolgender undurchlässiger Inkremente, von denen ein Teil auf dem

ersteren, ein zweiter Teil auf dem folgenden Maßstab liegt. Mit $x > 0$ soll ein unbestimmter kleiner Zusatzabstand bezeichnet werden, der die aus mechanischen Gründen erforderliche Toleranz der Teilungsanfänge enthält. Der Mikroprozessor erkennt an der Länge des Pseudocodefeldes, daß es sich nicht um ein echtes Codefeld handelt und kann diese Meßwerte ersatzlos ausscheiden.

Die Leistungsfähigkeit einer Meßeinrichtung nach diesem Erfindungsgedanken kann durch folgendes Zahlenbeispiel demonstriert werden:

Es wird angenommen, daß 4 Maßstäbe von je 2 m Länge verwendet werden. Das Teilungsintervall der Maßstäbe betrage

$$b = 500 \mu\text{m}$$

Ein Inkrement hat so eine Breite von 250 μm . Die Anzahl der Detektoren und ihre effektive Länge seien

$$n = 3 \\ l' = 25 \text{ mm}$$

und mögen je 1024 Elementen von je 25 μm Breite besitzen. Von dieser Länge wird als Nominallänge

$$l = 20 \text{ mm}$$

verwendet. Der Rest wird als Überlappungsbereich und als Toleranzreserve benutzt. Der Abstand der Codefelder beträgt dann

$$s = n \cdot l = 60 \text{ mm}$$

Die Codefelder sollen aus

$$m = 7$$

Inkrementen bestehen. Der erforderliche Überlappungsbereich beträgt dann $(m + 2) \cdot 250 \mu\text{m} = 2,25 \text{ mm}$, der damit die Hälfte der Differenz zwischen effektiver und nomineller Länge ausschöpft. Die gesamte nutzbare Länge L der Meßeinrichtung beträgt

$$L = s \cdot 2^m = 60 \cdot 128 = 7680 \text{ mm}$$

und kann gut die 4 Maßstäbe à 2 m Länge ausschöpfen. Die Standardabweichung der Ortsmessung eines einzelnen Inkrementes beträgt, wie die praktischen Erfahrungen zeigen

$$\Delta x(\text{Inkr}) = 1 \mu\text{m}$$

Auf den 3 Detektoren liegen $(3 \cdot 100) = 9$ Inkremente, wovon jedes zweite statistisch unabhängig ist. Die Standardabweichung der Ortsmessung der Anfangsmarke A eines Codefeldes beträgt damit

$$\Delta x(A) = \Delta x(\text{Strich})/\sqrt{145} = 0,083 \mu\text{m}$$

Das bedeutet eine Auflösung der Messung von ca. $\Delta x(A)/L = 1 \cdot 10^{-8}$.

Zum Vergleich: Eine Meßeinrichtung mit konventioneller, mehrspuriger Codierung brauchte bei gleicher Gesamtlänge und gleicher Auflösung mindestens 30 Spuren und eine zusätzliche 8fache Interpolation der feinsten Spur mit Inkrementen von 8 μm Breite.

Die Vorteile dieser Meßeinrichtung sind damit noch nicht erschöpft. Man macht sich leicht klar, daß mit entsprechend angelegten Meßprogrammen alle wichtigen Fehler der Meßeinrichtung in situ bestimmt werden können. Hierzu gehören die Teilungsfehler der Teilung, die Anschlußsprünge benachbarter Maßstäbe und die Abstandsfehler der Codefelder und der Detektoren. Der Einfluß dieser Fehler braucht daher nur mit den Restfehlern ihrer Messung berücksichtigt zu werden.

Patentansprüche

1. Präzisions-Meßeinrichtung für große Verschiebungen unter Verwendung von Maßstäben mit Präzisionsteilung, die mit eindimensionalen photoelektrischen Multidetektoren abgetastet werden, **dadurch gekennzeichnet**, daß mehrere, im wesentlichen gleichförmig und äquidistant geteilte Maßstäbe kollinear aneinandergelegt werden, daß die Teilungen in Abständen s von Codefeldern gleichartiger Teilungsinckremente unterbrochen werden, daß die Lage der Maßstäbe durch n , parallel zur Teilung angeordnete, zueinander fixierte und gemeinsam gegenüber den Maßstäben verschiebbliche Multidetektoren der effektiven Länge l gemessen wird, wobei der Abstand der Detektoren so gewählt ist, daß immer mindestens ein Codefeld auf einem der Detektoren liegt und $s = n \cdot l$ ist, und daß ein Mikroprozessor die photoelektrischen Messungen der Detektoren in eine absolute, von der Vorgeschichte unabhängige Positions-Differenz zwischen Detektoren und Maßstäben verwandelt.
2. Präzisions-Meßeinrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Codefelder von der übrigen Teilung dadurch unterschieden werden, daß zwei aufeinanderfolgende Inkremente der Teilung entgegen der Gleichförmigkeit nicht ihren Wert wechseln und daß die darauf folgenden m Inkremente als binäre Zahl zu interpretieren sind, so daß die Gesamtlänge $L = s \cdot 2^m$ der Meßstrecke in 2^m eindeutig gekennzeichnete Stücke zerlegt wird.
3. Präzisions-Meßeinrichtung nach Anspruch 1 und 2, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Störungen der Teilung an den Stoßfugen der Maßstäbe durch je eine gleichartige Folge von Inkrementen charakterisiert werden, deren Länge um mindestens drei Inkremente größer ist als die der Codefelder.

- Leerseite -

3818044

NACHGEREICHT

9 *

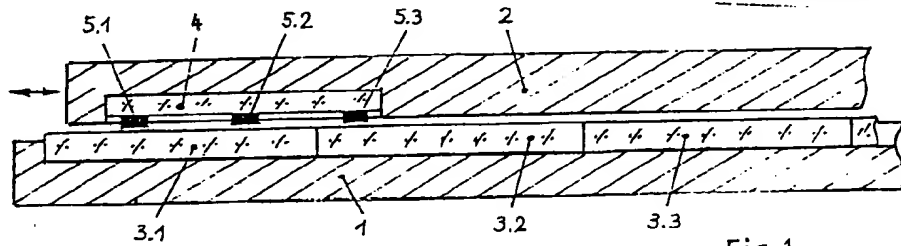


Fig. 1

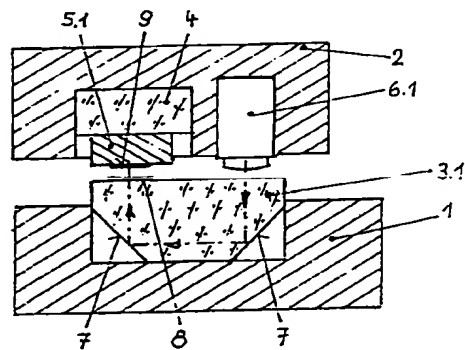


Fig. 2

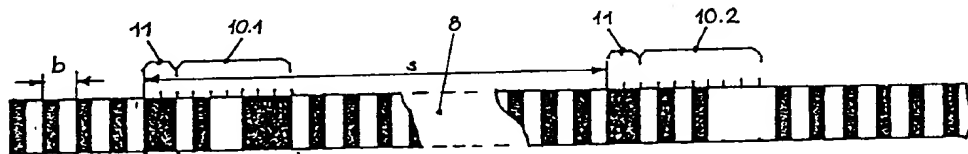


Fig. 3

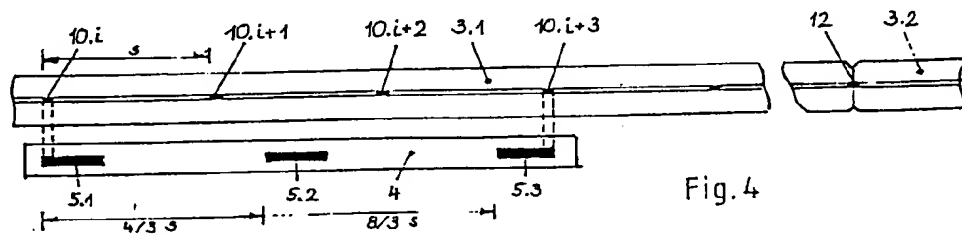
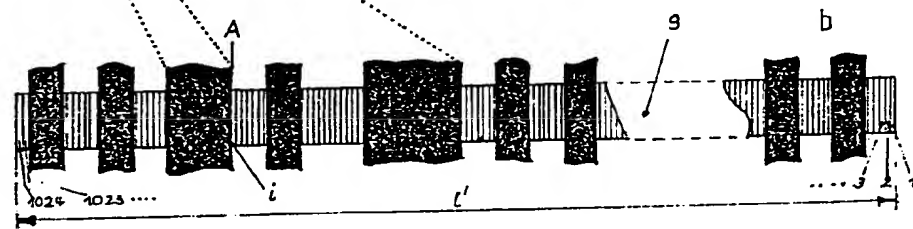


Fig. 4